

附录 A 典型膜结构风载体型系数

A.0.1 鞍形膜结构的风载体型系数可按表 A.0.1 采用(图 A.0.1-1、图 A.0.1-2)。

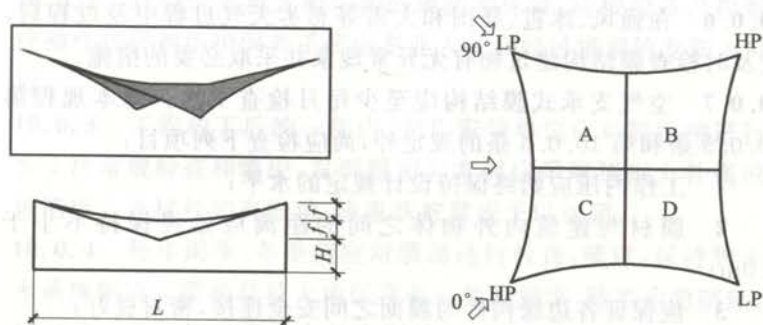


图 A.0.1-1 鞍形膜结构示意图 图 A.0.1-2 鞍形膜结构体型系数分区图

L —膜面两高点之间的跨度;

HP—膜面高点;LP—膜面低点

f —膜面矢高;

H —膜面低点距地面高度

表 A.0.1 鞍形膜结构体型系数

分区	风向角(下部封闭)			风向角(下部开敞)		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
A	-0.60	-0.90	-0.80	0.50	0.30	-0.20
B	-0.30	-0.30	-1.00	0.65	0.30	-0.55
C	-0.60	-0.90	-1.00	0.30	-0.16	-0.55
D	-0.60	-0.50	-1.00	0.50	-0.11	-0.70

注:本表适用于 $L \leq 21\text{m}$, $1/16 \leq f/L \leq 1/8$, $2 \leq L/H \leq 5$ 的情况。对于下部开敞情况,体型系数已考虑膜上下表面风压叠加。

A.0.2 伞形膜结构的风载体型系数可按表 A.0.2 采用(图 A.0.2-1、图 A.0.2-2)。

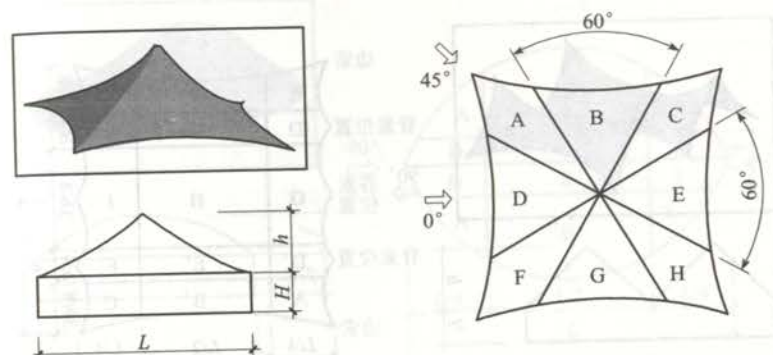


图 A.0.2-1 伞形膜结构示意图 图 A.0.2-2 伞形膜结构体型系数分区图

L —膜面两对边之间的跨度;

h —膜面矢高;

H —膜面底边距地面高度

表 A.0.2 伞形膜结构体型系数

分区	风向角(下部封闭)		风向角(下部开敞)	
	0°	45°	0°	45°
A	-1.00	0.30	-0.40	0.80
B	-0.60	-0.80	-0.50	0.20
C	-0.50	-1.30	-0.80	-1.00
D	-0.80	-0.80	0.60	0.20
E	-0.30	-0.60	-0.50	-0.50
F	-1.00	-1.30	-0.40	-1.00
G	-0.60	-0.60	-0.50	-0.50
H	-0.50	-0.40	-0.80	-0.30

注:本表适用于 $L \leq 27\text{m}$, $1/5 \leq h/L \leq 1/2$, $2 \leq L/H \leq 5$ 的情况。对于下部开敞情况,体型系数已考虑膜上下表面风压叠加。

A.0.3 脊谷形膜结构的风载体型系数可按表 A.0.3 采用(图 A.0.3-1、图 A.0.3-2)。

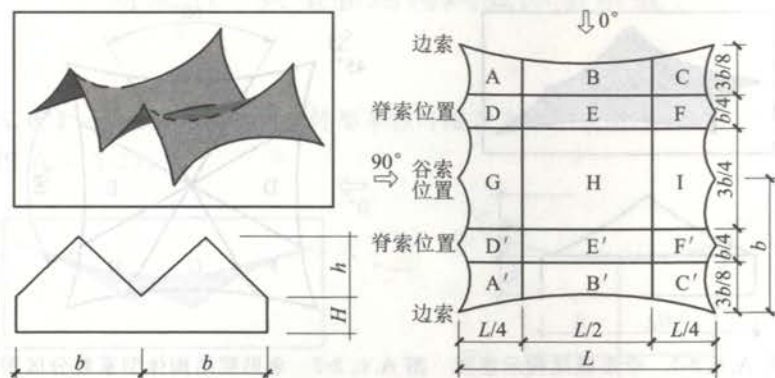


图 A.0.3-1 脊谷形膜结构示意图 图 A.0.3-2 脊谷形膜结构体型系数分区图
 L —膜面跨度; b —膜面两低谷之间的水平距离; h —膜面矢高;
 H —膜面底边距地面高度

表 A.0.3 脊谷式膜结构体型系数

分区	风向角		分区	风向角	
	0°	90°		0°	90°
A	-0.65	-1.20	A'	-0.50	-1.20
B	-1.20	-0.50	B'	-0.40	-0.50
C	-0.65	-0.20	C'	-0.50	-0.20
D	-0.90	-1.20	D'	-0.80	-1.20
E	-1.40	-0.50	E'	-0.90	-0.50
F	-0.90	-0.10	F'	-0.80	-0.10
G	-0.60	-1.40	—	—	—
H	-0.60	-0.45	—	—	—
I	-0.60	-0.30	—	—	—

注:本表适用于 $L \leq 40\text{m}$, $1/5 \leq h/L \leq 1/2$, $2 \leq L/H \leq 5$, 且下部封闭的情况。

A.0.4 拱支形膜结构的风载体型系数可按表 A.0.4 采用(图 A.0.4-1、图 A.0.4-2)。

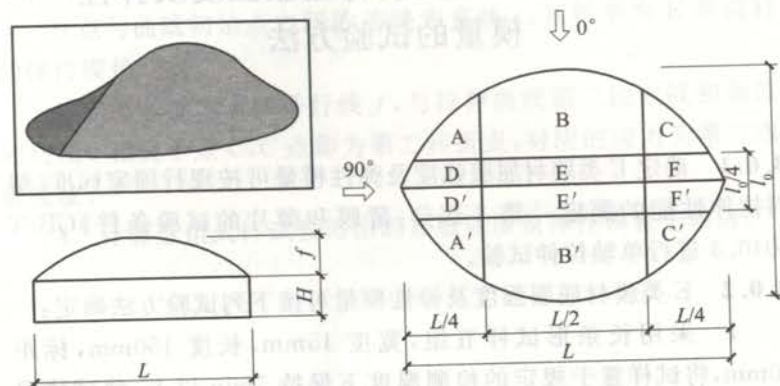


图 A.0.4-1 拱支形膜结构示意图 图 A.0.4-2 拱支形膜结构体型系数分区图
 L —膜面跨度; f —膜面矢高; H —膜面底边距地面高度

表 A.0.4 拱支式膜结构体型系数

分区	风向角		分区	风向角	
	0°	90°		0°	90°
A	-0.40	-0.40	A'	-0.80	-0.40
B	-0.40	-0.60	B'	-0.80	-0.60
C	-0.40	-0.40	C'	-0.80	-0.40
D	-0.80	-0.20	D'	-1.30	-0.20
E	-0.30	-0.50	E'	-1.30	-0.50
F	-0.80	-0.20	F'	-1.30	-0.20

注:本表适用于 $L \leq 40\text{m}$, $1/7 \leq f/L \leq 1/4$, $2 \leq L/H \leq 5$, 且下部封闭的情况。

附录 B 确定 E 类膜材屈服强度及弹性模量的试验方法

B.0.1 确定 E 类膜材屈服强度及弹性模量可按现行国家标准《塑料拉伸性能的测定 第 3 部分：薄膜和薄片的试验条件》GB/T 1040.3 进行单轴拉伸试验。

B.0.2 E 类膜材屈服强度及弹性模量可按下列试验方法确定：

1 采用长条形试样五组，宽度 15mm，长度 150mm，标距 50mm，将试样置于规定的检测温度下保持 5min 以上，使试样温度达到平衡；

2 采用等速伸长试验机，拉伸速度 50mm/min；

3 记录应力-应变曲线，确定 E 类膜材应力-应变曲线两个转折点 B 和 C(图 B.0.2)。

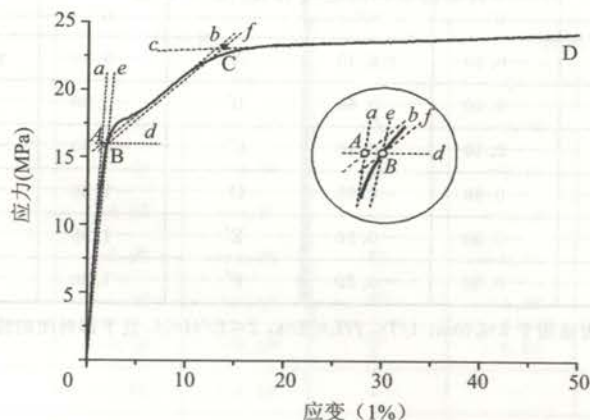


图 B.0.2 E 类膜材屈服强度及弹性模量确定示意图

做曲线初始段的切线 a ，与两转折点间曲线的近似直线 b 相

交于点 A；过点 A 做水平线 d 与拉伸曲线相交于点 B，B 点即为第一转折点，对应的应力为第一屈服强度。

B 点与曲线初始点之间的连线为直线 e ，其斜率为 E 类膜材的弹性模量。

过点 B 作直线 b 的平行线 f ，与拉伸曲线第三段曲线初始段的切线 c 相交于点 C，C 点即为第二转折点，对应的应力为第二屈服强度。

4 计算五组试样试验得出的屈服强度及弹性模量平均值。

附录 C 确定 G 类、P 类膜材弹性模量及泊松比的试验方法

C.0.1 试验采用双轴拉伸试验机对十字形切缝试样进行比例加载,得到不同加载状况下膜材经向和纬向的荷载-应变曲线后,计算得到膜材的经向、纬向的弹性模量和泊松比。

C.0.2 G 类、P 类膜材的弹性模量及泊松比可按下列试验方法确定:

1 十字形切缝试样(图 C.0.2)应按照膜材的经向、纬向对称取样,且试样核心区域的臂宽以及悬臂的臂长均不小于 160mm。沿悬臂方向间隔 30mm~50mm 做均匀切缝处理,试样过渡圆弧半径 5mm~15mm。同一检测批的膜材至少选用三块试样进行试验。

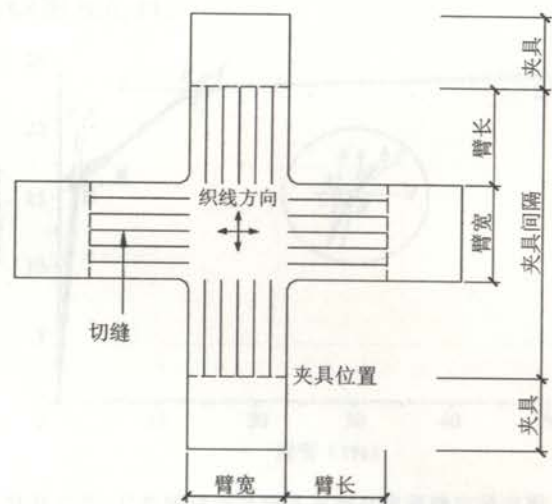


图 C.0.2 十字形切缝试样

2 试验中可采用变形控制或力控制。采用变形控制应保持恒定速率拉伸,应取(2~10)mm/min;采用力控制应保持恒定力增速拉伸,应取(1~10)kN/m/min。

3 试样固定于双轴拉伸试验机上,按下列步骤测量荷载-应变值:

- 1) 保持试样经向、纬向的张拉荷载比例为 1:1,沿标准张拉轴按照恒定速率或恒定力增速拉伸,加载至抗拉强度的 1/4(当膜材经向、纬向的抗拉强度有所区别时,取其中较低值的 1/4 作为试验中的最大荷载)。测量试件核心区域经向、纬向应变,初始标距 20mm~80mm,张拉荷载取经向、纬向平均工程应力,记录此时荷载-应变曲线。
- 2) 加载后立即卸载。卸载过程中保持和加载过程中相同的荷载比例及速率。当荷载到 0 后立即重复步骤 1)。
- 3) 重复以上步骤三次。
- 4) 按表 C.0.2 荷载比例的顺序,进行第一种荷载比例的加载试验,记录荷载-应变曲线用于弹性模量和泊松比计算。重复 1)~3) 试验步骤,再进行第二种荷载比例的加载试验,记录荷载-应变曲线用于弹性模量和泊松比计算。重复以上循环,直至完成五种荷载比例试验。

试验中使用的荷载比例见表 C.0.2,对每块试样的荷载施加顺序是 1:1、2:1、1:2、1:0、0:1。标准拉伸轴与荷载较大的方向一致。当荷载比例为 1:1 时,与经向一致。

表 C.0.2 荷载比例

纱线方向	荷载比例				
经向/纬向	1/1	2/1	1/2	1/0	0/1

4 采用应变项残差平方和最小的最小二乘法计算试样弹性模量和泊松比。

取三次试验计算的平均值作为最终的试验结果。用于计算的

荷载-应变曲线范围为:从 2kN/m 的荷载点到 1/4 抗拉强度的荷载点。弹性模量的单位取 N/mm²,修约至 10N/mm²,泊松比修约至 0.01。

- 1) 假定膜材为正交各向异性弹性材料,本构关系按式 C.0.2-1 确定。

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{N_x}{E_x t} - \frac{N_y}{E_y t} \nu_y \\ \epsilon_y &= \frac{N_y}{E_y t} - \frac{N_x}{E_x t} \nu_x\end{aligned}\quad (\text{C.0.2-1})$$

式中: N_x ——十字形膜材试样经向荷载(kN/m);

N_y ——十字形膜材试样纬向荷载(kN/m);

ϵ_x ——十字形膜材试样经向应变;

ϵ_y ——十字形膜材试样纬向应变;

E_x ——涂层织物膜材经向弹性模量(N/mm²);

E_y ——涂层织物膜材纬向弹性模量(N/mm²);

ν_x ——涂层织物膜材经向泊松比;

ν_y ——涂层织物膜材纬向泊松比;

t ——膜材厚度(mm)。

- 2) 按式 C.0.2-2 计算五条不同经向、纬向荷载比例下得到的荷载-应变曲线的应变残差平方和。

$$S = \sum_{i=1}^5 [(E_{11} N_{xi} + E_{12} N_{yi} - \epsilon_{xi})^2 + (E_{22} N_{yi} + E_{12} N_{xi} - \epsilon_{yi})^2] \quad (\text{C.0.2-2})$$

$$\begin{aligned}E_{11} &= \frac{1}{E_x t} \\ E_{22} &= \frac{1}{E_y t} \\ E_{12} &= -\frac{\nu_x}{E_x t} = -\frac{\nu_y}{E_y t}\end{aligned}\quad (\text{C.0.2-3})$$

- 3) E_{11} 、 E_{12} 、 E_{22} 相互独立,根据方程组 C.0.2-4 计算 E_{11} 、 E_{12} 、 E_{22} 。

$$\frac{\alpha S}{\alpha E_{11}} = \frac{\alpha S}{\alpha E_{22}} = \frac{\alpha S}{\alpha E_{12}} = 0 \quad (\text{C.0.2-4})$$

- 4) 根据表达式 C.0.2-5 可计算 E_x 、 E_y 、 ν_x 、 ν_y 。

$$\begin{aligned}E_x &= \frac{1}{E_{11} t} \\ E_y &= \frac{1}{E_{22} t} \\ \nu_x &= -\frac{E_{12}}{E_{11}} \\ \nu_y &= -\frac{E_{12}}{E_{22}}\end{aligned}\quad (\text{C.0.2-5})$$

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1) 表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《建筑结构荷载规范》GB 50009

《建筑抗震设计规范》GB 50011

《建筑设计防火规范》GB 50016

《建筑采光设计标准》GB/T 50033

《建筑照明设计标准》GB 50034

《建筑物防雷设计规范》GB 50057

《民用建筑隔声设计规范》GB 50118

《民用建筑热工设计规范》GB 50176

《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205

《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300

《建筑内部装修设计防火规范》GB 50222

《民用建筑设计通则》GB 50352

《无障碍设计规范》GB 50763

《塑料拉伸性能的测定 第3部分:薄膜和薄片的试验条件》
GB/T 1040.3

《优质碳素结构钢》GB/T 699

《合金结构钢》GB/T 3077

《建筑材料及制品燃烧性能分级》GB 8624

《重要用途钢丝绳》GB/T 8918

《不锈钢丝绳》GB/T 9944

《一般工程用铸造碳钢件》GB/T 11352

《斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件》GB/T 18365

《锌-5%铝-混合稀土合金镀层钢丝、钢绞线》GB/T 20492

《钢拉杆》GB/T 20934

《索结构技术规程》JGJ 257

《建筑用不锈钢绞线》JG/T 200

《膜结构用涂层织物》FZ/T 64014

《冶金设备制造通用技术条件 铸钢件》YB/T 036.3

《高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线》YB/T 152

《镀锌钢绞线》YB/T 5004

中国工程建设协会标准

膜结构技术规程

CECS 158 : 2015

条文说明

目 次

2	术语和符号	(57)
3	设计基本规定	(58)
3.1	膜结构选型	(58)
3.2	建筑设计	(58)
3.3	结构设计	(61)
4	材 料	(65)
4.1	膜材	(65)
4.2	拉索和锚具	(69)
5	结构计算	(70)
5.1	一般规定	(70)
5.2	初始形态分析	(72)
5.3	荷载效应分析	(73)
5.4	裁剪分析	(78)
6	连接构造	(80)
6.1	一般规定	(80)
6.2	膜材的连接	(81)
6.3	膜与刚性边界的连接	(81)
6.4	膜与柔性边界的连接	(81)
7	制 作	(82)
8	安 装	(84)
8.1	钢构件、拉索安装	(84)
8.2	膜单元安装	(84)
8.3	施加预张力	(84)
9	工程验收	(86)
10	维护和保养	(87)

2 术语和符号

3 设计基本规定

3.1 膜结构选型

3.1.1 本次修订继续沿用了按膜材及其相关构件受力方式划分的分类方法,将膜结构分为四种形式。

3.1.2 整体张拉式膜结构主要由索和膜构成,两者共同起承重作用,通过支承点和锚固点形成整体受力。

3.1.3 骨架支承式膜结构由钢构件(如拱、刚架)或其他刚性结构起承重作用,膜材仅起围护作用。

3.1.4 索系支承式膜结构主要由索、杆和膜构成,三者共同起承重作用。在通常所称的张拉整体结构(tensegrity)、索穹顶结构(cable dome)中,如采用膜材,也属于索系支承式膜结构。

3.1.5 以密闭空间内气压与大气压的差来张紧膜材,是空气支承式膜结构的一个特点,一般也称为充气结构,其设计与构造与传统结构有许多不同之处。

3.2 建筑设计

3.2.2 膜结构建筑的表现形式与一般建筑有所不同,在建筑单体设计阶段,应充分考虑到不同表现方式的内容与协调,并注意利用膜结构建筑技术所具有的形象特点,因势利导。膜结构建筑的方案设计应由建筑师与膜结构工程师共同完成。设计时首先应考虑膜结构体系的特殊性,从建筑功能和结构受力性能入手,创造出形式美观、构造合理的膜结构建筑。

3.2.4 大型室内公共建筑必须明确防火设计思想,除基本的消防分区、消防设施、消防通道之外,针对膜建筑的特点,必须明确选用膜材,特别是内膜的防火等级,当有条件时应尽量采用不燃类材

料。当永久性建筑采用难燃类膜材时,尚应根据当地消防部门的要求采取必要的防火措施。当膜距离楼面、地面 8m 以上时,膜材防火要求可适当降低。

根据现行国家标准《建筑内部装修设计防火规范》GB 50222—95(2001 年版)中第 2.0.4 条规定:“安装在钢龙骨上燃烧性能达到 B1 级的纸面石膏板、矿棉吸音板,可作为 A 级装修材料使用”。按照此条规定,防火检验为 B1 级的膜材,如使用中安装在钢结构上,且燃烧性能经检验可达到或超过纸面石膏板、矿棉吸音板,可作为 A 级不燃材料使用。

3.2.5 膜建筑声环境设计需考虑室内回声作用及外部噪声屏蔽两方面的因素,增加膜的层数、采用吸声内衬膜材、控制膜夹层间距,以及在膜层上负重等措施都是改善声学性能的有效措施。另外,膜屋面如采用保温隔热材料,宜考虑与隔声材料的统一协调。对于 ETFE 气枕结构,还可通过增加气枕空腔数量和增设隔音层等措施改善隔声效果。频率低于 500Hz 的噪声在双层膜中传播时可降低 5dB~10dB。对于频率大于 700Hz 的噪声,预张力高的膜材降噪作用比非张拉膜材要小。对于频率小于 700Hz 的噪声,噪声的降低基本不受膜材预张力的影响。

3.2.6 膜结构建筑采用的膜材一般均具有透光特性。由于漫射光的作用,膜材覆盖的空间内将呈现特殊的光学效果(有明显光感但无阴影),建筑设计中应予以合理利用。但采光的利用和室内温度控制的要求应权衡考虑,尤其要考虑到膜材透光过高会使夏季室内温度过高。ETFE 膜材的表面可以通过镀点处理和印刷图案来降低透光率,也可涂刷白色颜料使膜材变成半透明以降低日光照射。此外,通过调整各个气腔之间的压力差,使中间层的不透明图案相互重叠或错开,可使气枕的遮阳率呈现不同的变化。

本条中的热源灯具,不仅指热辐射光源,如白炽灯、卤钨灯等,也包括大功率气体放电灯。条文中提到的 1.0m 间距,为经验数据,该数据与灯光表面温度、灯光投射角、散热量及膜面物理特性

有关。

3.2.7 膜结构建筑需重视保温隔热性能,目前已广泛使用的膜材,自身并不能较好地隔绝外部温度的影响。单层膜结构仅适用于开敞式建筑或气候较温和的地区。对于封闭式建筑物,应注意采用其他构造方式解决保温隔热问题。双层膜构造可以较好地满足保温、隔热要求,两层之间的空气隔离层一般在100mm~500mm之间,在严寒地区、寒冷地区,除采用双层膜外,应在内外膜之间采用轻质保温材料。在选择保温材料时应考虑其力学稳定性、透光性、热稳定性及耐潮防腐能力。此外在膜材表面加上LOW-E等低辐射涂层,也可增加膜材保温隔热性能。

膜屋顶内表面的凝结水会对膜材产生不利影响,且会降低保温膜材的性能,甚至会影响室内声学效果,设计中应予以注意。采用有保温隔热层的多层膜结构,在双层膜之间设置独立的通风系统是防止结露的有效措施。此外,内膜宜形成坡度以便于凝结水的收集和排除。在高湿度环境中ETFE气枕单元中宜安装除湿器,通过增加气腔数量,也可明显改善ETFE气枕的热工性能。

3.2.8 膜结构建筑应有足够的坡度以解决排水问题并预防积雪。屋面排水设计从方案阶段就应予以高度重视,以免造成重大工程隐患。当膜屋面采取融雪设备时,膜面坡度可适当减小。大型公共膜建筑(3000m²以上)宜采取有组织排水,小型开敞膜建筑(1000m²)可无组织排水,中型公共膜建筑(1000m²~3000m²)宜根据其高程、封闭性选取合适的排水型式。采取有组织排水方式时,排水管的位置应注意与建筑立面综合考虑,导水与集水设施应与膜细部节点协调设计,并应通过排水能力计算。采取无组织排水方式时,应注意采取对建筑物墙面或地面的防污措施。

3.2.9 膜结构建筑应确定合理的防雷方案,建筑顶面设置接闪针或接闪带,也可利用突出膜面的金属构件作为接闪器。支撑膜面的钢柱、钢桅杆、钢索等金属构件可作为雷电流引下线。基础钢筋可作为接地体。膜结构建筑通常采用联合接地方式,接地电阻不

应大于1Ω。

3.2.11 膜面在风荷载作用下的变形分布实际上是很复杂的,另外,工程使用中还存在意外荷载造成膜面局部较大位移的可能,因此条文中规定了1.0m的限值。在变形极值可准确预估的情形下,设计人员可结合工程实际情况适当放宽此数值。

3.2.12 在满足对室内空间使用要求的情况下,气承式膜结构膜顶高度越大建筑成本越高、日常使用耗能也越大,然而膜顶高度太低容易积雨、积雪,甚至会引起坍塌,故建议矢跨比在1/3~2/3之间。当气承式膜结构承受的雪荷载较小或具有融雪或除雪设施时,最小矢跨比可以适当降低。

当气承式膜结构跨度超过30m、正常工作内压为200Pa时,一般情况下膜中预应力已超过本规程规定3kN/m的预应力限值,可以采用纵横向索予以加强。如果跨度超过40m,采用斜向交叉索网是减少膜内预应力的有效途径,斜向交叉索网也可以有效限制膜体的位移。加密的斜向交叉索网可将膜体破坏控制在一定范围之内。

气承式膜结构建筑的应急出口应采用直通室外并向外开启的机械式平推门、旋转门和电子气锁门不得作为应急出口。

气承式膜结构建筑用于游泳馆等项目时,在灾害天气下如果塌落,容易造成水中的人员窒息死亡,应设置防塌落设施,形成三角躲避空间,方便救援。

3.3 结构设计

3.3.1 按照承载力极限状态和正常使用极限状态进行结构整体和构件设计时,需考虑的极限状态有:

- (1)膜、索、锚固件强度可抵抗最不利荷载组合计算的内力。
- (2)膜可抵抗长期荷载作用效应,如充气气压、恒荷载、膜徐变等。
- (3)由于大变形可导致膜面积水,但不致需要操作人员主动干

涉,结构可承受。否则,积水导致局部挠曲过大、膜受力过大、膜失稳塌落。充气膜结构具有比传统普通结构大的变形,改变气压可部分控制结构刚度,相应控制变形。(变形刚度限值)

(4)未变形状态膜、索与内外物体保持合适净间距,取使用荷载和正常工作内压下挠度2倍。否则,易导致膜、索被内外物体刺破、磨损,或者损坏内部的灯、管线等。应避免尖锐物体超过设计净空限制。

(5)膜结构金属构件或连接件应防腐,不致由于腐蚀影响结构安全度。

(6)确定构件(特别是膜)抗力时需考虑环境老化影响。老化不仅与材料有关,还与使用环境(如紫外线、温度变化、湿度等)有关。

其中,(1)、(2)、(5)、(6)为承载力极限状态,(3)、(4)为正常使用极限状态。

3.3.2 国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 修订后对结构重要性系数 γ_0 做了两点改变:① γ_0 不仅考虑结构的安全等级,而且考虑了结构的设计使用年限;②将原标准取值中的“等于”改为“不应小于”,使不同投资者对结构安全度设计有更多的选择余地。对于一般工业与民用建筑膜结构,其安全等级多为二级,其设计使用年限为50年,因此其结构重要性系数不应小于1.0;对于设计使用年限为(15~25)年的易于替换的膜材,其结构重要性系数可适当降低,取为不小于0.95;对于临时性的膜结构,设计使用年限为5年,其结构重要性系数取为不小于0.9。应该指出:膜结构下部的钢或钢筋混凝土承重结构,其设计使用年限仍可采用50年,当膜结构达到设计使用年限时,可以更换膜材,从而达到与下部结构同样的设计使用年限。

3.3.3 永久荷载和可变荷载的分类参见现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012第3.1.1条。

膜结构的恒荷载包括:膜、索、连接件自重,吊挂设备(如照明、

音响、管槽线、内衬膜、隔热层、自动喷淋、监测控制管线和设备等)自重。

膜结构的施工检修荷载不仅要考虑均布荷载,还需考虑集中荷载的影响,集中荷载的大小和作用位置,应根据安装方式和结构形状确定。

内气压是充气膜结构所特有的参数,它既是一个结构内部抗力特性参数,又是一种长期载荷。保持合适内气压值可保证结构合理刚度、形态稳定和材料强度,在各种设计载荷下,膜面不出现过大变形、振动、褶皱、局部低沉凹陷等。

3.3.5 由于膜结构受力具有较强的几何非线性,其各项荷载不能进行线性组合,因此本条规定采用两种组合类别。其中第一类组合相当于长期(持久)荷载组合,第二类组合相当于短期(临时)荷载组合,并以抗力分项系数进行调节。

对于空气支承式膜结构,应分别按正常工作内压和最大工作内压两种情况,按条文表3.3.5的荷载效应组合进行计算。

3.3.6 风荷载是膜结构的主要荷载。由于膜结构的体型较复杂,而现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009所提供的建筑体型有限,所以膜结构的风荷载体型系数一般都需要通过风洞试验来确定。当所设计的膜结构为园林景观小品或临时性建筑时,可参考以往的工程确定风荷载体型系数。本规程附录A列出的风荷载体型系数根据哈尔滨工业大学所做的风洞试验结果以及参考有关国内外资料汇编而成。

3.3.7 由于作为屋面结构的膜结构,其曲面多为负高斯曲率曲面,结构上的雪荷载一般为非均匀分布,因此应根据不同的曲面形状、曲率变化调整雪荷载的分布。

本条还强调消除或减小雪荷载的除雪措施,通常可采用的除雪方法有:融雪法、除雪法或两者结合。

融雪法是通过引入适当热量,加速膜表面雪的融化,不致在屋面形成大量积雪。融雪系统设计需要进行合理准确的热功计算,

考虑建筑容积、屋面表面积、膜导热性、空气对流、充气渗气等热损耗,散热元件功率、效率等。另外,在结构分析时应考虑最大可能积雪和飘积率,以此作为设计雪载荷。

除雪法是采用合适的除雪措施,及时消除屋面积雪。可采用的除雪措施有:高压喷水(可以为温水,同时起到融雪作用)、振动(振动膜面,使雪滑落)、绳索推刮(由索将膜面积雪刮落)。除雪法适用于中小型工程。

上人除雪不能作为一般除雪方法,但在特殊情况下或局部可采用。

3.3.8 膜结构设计中,除了保证结构体系的整体稳定外,还应保证在局部膜片破坏或局部索退出工作时不应引起结构整体失效。由于膜材在拉应力作用下存在松弛、徐变等问题,张拉式膜结构在正常使用(1~2)年后需要进行第二次张拉,结构设计时应考虑二次张拉对结构整体的影响。

由于材料自身存在老化问题,各类膜材均有一定的使用年限。对于永久性建筑,当膜材达到使用年限或部分膜片在使用期间出现破损时,需要更换膜材,这一点在结构整体设计时宜予以考虑。

3.3.9 膜结构设计时,可考虑采用下列方法施加预张力:在边缘直接张紧膜面[图 1(a)];拉紧周边索[图 1(b)];拉紧稳定索[图 1(c)];顶升中间支柱[图 1(d)]等。

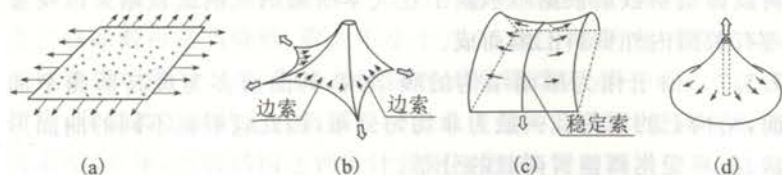


图 1 膜面施加预张力的方法

4 材 料

4.1 膜 材

4.1.1 本规程包括目前常用的三类膜材,G类、P类和新兴起来的E类。

ETFE(ethylene tetra fluoro ethylene)是一种高分子材料,具有良好的耐化学性能。薄膜可通过高温熔化 ETFE 颗粒后经挤压成型得到,用于建筑屋面或墙面材料时其厚度通常为(80~300) μm 。ETFE 膜材具有透光率高、抗老化性、自洁性好等优点,适用于对透光率有较高要求的建筑物。但由于其强度低,可应用于较小跨度的单元。考虑到应用日益增多,本次修订增加 ETFE 膜材作为 E 类。

由于膜材的理化性能和力学性能对膜结构实用性和寿命影响甚大,因此应根据使用功能合理选择膜材类型。

4.1.2 涂层织物膜材可采用不同基布和涂层材料构成,目前各国生产的膜材种类很多,且新的品种不断出现,采用现行行业标准《膜结构用涂层织物》FZ/T 64014 规定的标识方式便于选用和区分。G类和P类膜材以“基布纤维/涂层材料/防污面层”的英文缩写字母表示。例如:

——P/PVC/PVF:聚酯纤维织物/聚氯乙烯(PVC)/聚偏氟乙烯(PVF)

——P/PVC/PVDF:聚酯纤维织物/聚氯乙烯(PVC)/聚偏氟乙烯(PVDF)

——P/PVC/TiO₂:聚酯纤维织物/聚氯乙烯(PVC)/二氧化钛(TiO₂)

——G/PTFE:玻璃纤维织物/聚四氟乙烯(PTFE)

不同膜材的耐久性、自洁性、透光性、热融合性、柔韧性有较大差别,可根据膜材生产企业提供的资料选用,也可按现行行业标准《膜结构用涂层织物》FZ/T 64014 的规定进行检验。

4.1.3 涂层织物膜材承载力主要取决于基布纤维的粗细和纱线根数,工程中习惯以厚度和重量的不同加以区分。由于对膜材的强度尚无条件进行科学的统计,本条仍采用原规程对膜材的归类,即将 G 类和 P 类膜材分别划分为六个不同强度级别,将强度单位规范为 N/5cm,并赋予简单代号。在选择膜材料时应以强度指标为主,材料厚度、克重作为参考指标,综合考虑自洁性、耐久性、经纬向弹性模量差异、透光性等其他物理指标采用。

考虑工程中 $6\mu\text{m}$ 玻璃纤维基材的 G 类膜材仍有应用,此次修订保留了 $6\mu\text{m}$ 玻璃纤维丝,由于其柔性较差,在膜材加工、运输、安装过程中发生不可避免的折叠时,会出现较多的玻璃纤维丝断裂现象,导致膜材有效强度的降低,因此,对于大型或复杂膜结构不应采用 $6\mu\text{m}$ 玻璃纤维基材的 PTFE 膜材。

膜材生产企业通常用破断强度现行行业标准(《膜结构用涂层织物》FZ/T 64014 称为断裂强力)表示膜材的极限承载力,应该是经过统计而得出的保证率为 95% 的标准强度值。本规程将其表述为极限抗拉强度标准值,为的是与各种结构设计规范保持一致。对于强度保证率不确定的膜材,其极限抗拉强度标准值应根据现行行业标准《膜结构用涂层织物》FZ/T 64014 试验所得出的断裂强力确定,并按测试值减小 5% 使用。

4.1.4 通过对两个生产厂家、5 种厚度($80\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $250\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$)、总计 300 根试样的单轴拉伸试验,得到室温条件下保证率为 95% 时的第一屈服强度、第二屈服强度以及极限抗拉强度标准值。单向拉伸试验表明,ETFE 膜材长度方向与宽度方向的拉伸性能基本相同,设计中可将 ETFE 膜材按各向同性材料处理。不同厚度的材料强度差异不大,无须再细分级别,设计中可根据结构承载力要求选用不同厚度膜材或膜材层数。

研究表明,E 类膜材单向拉伸应力应变曲线经历了两个比较明显的刚性转折点(图 2 中 B 点和 C 点),分别定义两个转折点为 E 类膜材的第一屈服点和第二屈服点。第一屈服点 B 之前应力应变呈近似直线关系,可以认为材料处于弹性状态。经过 B 点后,应力应变曲线仍保持近似直线,但直线的斜率迅速减小,可以认为材料发生屈服。当应力超过第二屈服点 C 后,材料迅速被拉长,随着应变的大幅度增加,逐渐出现应力强化并最终断裂。试验统计结果还表明,第一及第二屈服强度数据标准差较小,屈服强度是描述 E 类膜材强度值的可靠指标。

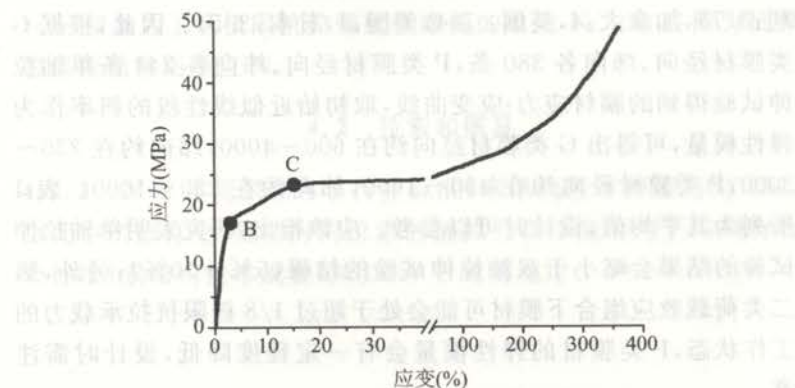


图 2 E 类膜材单轴拉伸曲线

高温环境下 E 类膜材强度将出现较为明显的下降。试验表明,当温度从 20°C 升高到 40°C 时,E 类膜材的屈服强度与破断强度将下降约 20%。由于膜结构强度主要受风荷载控制,暴风时气温一般不会达到 40°C ,因此仍可按室温时的强度值进行设计。当 ETFE 膜结构经历持续 40°C 以上高温时,需进行膜材强度试验并在设计中对强度值进行折减。本规程附录 B 规定了试验确定 E 类膜材第一及第二屈服点的方法。

4.1.5 涂层织物膜材是正交异性的粘弹性体,具有明显的非线性,研究表明其弹性常数不仅受纤维材质、粗细、编织方法和涂层

性质影响,而且与所加的荷载、加载历史以及经向、纬向张力比有关,理论上对其规格化是非常困难的。因此工程应用中需根据具体工程、具体膜材通过试验确定。国内外研究多认为双轴拉伸试验更符合膜材的受力情况,建议采用正交比例加载,进行重复拉伸试验确定其弹性模量。因此,本条规定由生产企业提供或通过试验确定,本规程附录 C 给出了具体的试验方法。

各国规范均认为通常膜面应力仅用到膜材极限抗拉承载力的 $1/10 \sim 1/8$,大致处于膜材应力-应变曲线初始近似线性段,第二类荷载效应组合下也不允许超过膜材极限抗拉承载力的 $1/4$ (意大利:3.75,加拿大:4,英国: ≥ 4 ,美国:4,日本:3.5)。因此,根据 G 类膜材经向、纬向各 380 条, P 类膜材经向、纬向各 244 条单轴拉伸试验得到的膜材应力-应变曲线,取初始近似线性段的斜率作为弹性模量,可得出 G 类膜材经向约在 $600 \sim 4000$,纬向约在 $230 \sim 2000$; P 类膜材经向约在 $490 \sim 1600$,纬向约在 $220 \sim 1000$ 。表 1 所列为其平均值,设计时可以参考。应该指出,研究表明单轴拉伸试验的结果会略小于双轴拉伸试验的结果($5\% \sim 10\%$);另外,第二类荷载效应组合下膜材可能会处于超过 $1/8$ 极限抗拉承载力的工作状态, P 类膜材的弹性模量会有一定程度降低,设计时需注意。

表 1 涂层织物膜材的弹性模量

	G 类	P 类
经/纬 % 弹性模量(N/mm ²)	1400/600	1000/400

4.1.6 由于 E 类膜材可以认为是各向同性材料,本条给出了经向单轴拉伸试验统计确定的 E 类膜材弹性模量和泊松比。

E 类膜材单轴循环拉伸试验表明,当应力小于第一屈服强度时循环拉伸不会发生残余应变,而当应力大于第一屈服强度时,循环拉伸将会使材料发生残余应变。300 条 E 类膜材试样单轴拉伸试验得到的第一屈服强度均值为 18.4MPa ;另一方面,按本规程第 5.3.6 条规定的 E 类膜材设计强度值按结构形式及荷载组合

为 $9.1\text{MPa} \sim 18.8\text{MPa}$,即 E 类膜材的工作状态基本上处于第一屈服强度以内,可按线弹性分析。因此,本规程取第一屈服点 B 之前应力-应变曲线近似直线的斜率作为设计用弹性模量,可按附录 A 规定的试验方法进行检验。如果 E 类膜材处于超过第一屈服强度的工作状态,其弹性模量会有一定程度降低,设计时需注意。

4.1.7 抗撕裂强度、抗剥离强度是反映织物类膜材质量的重要指标,因此本次修订新增此条,并参照现行行业标准《膜结构用涂层织物》FZ/T 64014 的规定给出了不宜采用的下限值,条文中“乘以 1cm ”仅是为了从极限抗拉强度标准值的单位 $\text{N}/5\text{cm}$ 转换为抗撕裂强度通常单位 N 。

4.2 拉索和锚具

4.2.3 2012 年我国颁布了行业标准《索结构技术规程》JGJ 257,因此本次修订中,膜结构用拉索的抗拉力设计值采用了与现行行业标准《索结构技术规程》JGJ 257 一致的规定。

5 结构计算

5.1 一般规定

5.1.1 膜结构的初始形态确定、荷载效应分析、裁剪设计是相互影响、相互制约的过程,需要反复调整。同时还要考虑施工过程的实现,如施工工艺、初始预张力等问题。

初始形态分析主要是确定满足一定初始应力分布的膜结构在自平衡状态下的几何形状。荷载效应分析主要是计算在荷载作用下满足静力平衡条件的结构内力和位移。裁剪分析主要是将空间膜曲面适当剖分并展开为平面,计算确定预张力影响下膜材的裁剪下料图。

5.1.2 膜结构的计算分析方法很多,目前得到公认并被广泛应用的主要有三种:非线性有限元法、动力松弛法和力密度法。

非线性有限元法是将膜结构进行有限元离散,采用大位移小应变的几何非线性有限元方法对膜结构进行分析,得到结构的位移和内力。基本计算公式如下:

$$([K_L] + [K_{NL}])\{\Delta u\} = \{P\} - \{F\} \quad (1)$$

式中: $[K_L]$ ——线性刚度矩阵;

$[K_{NL}]$ ——非线性刚度矩阵;

$\{P\}$ ——荷载列向量;

$\{F\}$ ——等效结点力向量。

动力松弛法是将膜结构离散为结点和结点间的连接单元,通过对各结点施加激振力使之产生振动,然后逐步跟踪各点的振动过程直至最终求得结构平衡状态。基本计算公式如下:

$$V_{ij}^{t+\Delta t/2} = V_{ij}^{t-\Delta t/2} + \frac{\Delta t}{M_i} R_i^t \quad (2)$$

式中: $V_{ij}^{t-\Delta t/2}$ ——时间间隔 $t-\Delta t \sim t$ 内结点 i 在 x_j 方向的平均速度;

$V_{ij}^{t+\Delta t/2}$ ——时间间隔 $t \sim t+\Delta t$ 内结点 i 在 x_j 方向的平均速度;

M_i —— i 结点的虚拟集中质量;

R_i^t —— t 时刻作用在结点 i 上的 x_j 方向的残余力;

Δt ——时间间隔。

力密度法是将膜结构离散为由结点和杆件组成的索网结构,在给定的几何拓扑、支座位置和力密度值(即索力与索长之比)下,通过求解节点坐标的线性方程组来确定结构的变形。基本计算公式如下:

$$[D]\{X\} = \{P\} \quad (3)$$

式中: $[D]$ ——由杆件力密度组成的对称矩阵;

$\{X\}$ ——结点坐标列向量;

$\{P\}$ ——荷载列向量。

5.1.3 膜结构中的索、膜构件只能承受拉力、不能承受压力和弯矩作用,对外荷载的抵抗主要通过变形来实现,因而膜结构在外荷载作用下变形较大,计算时应考虑结构的几何非线性。膜材是非线性材料,其应力-应变曲线在应力较大时变化较大,但通常设计应力比断裂强度小得多,此时可近似认为膜材是线弹性的。

5.1.4 由于支承结构变形对膜结构内力分布影响较大,膜结构设计时宜考虑膜与支承结构协同工作。对于骨架支承式膜结构,由于支承结构均为刚性体系(如钢桁架、拱或网架等),变形较小,计算时可将膜与刚性骨架连接处近似视为固定支承边界。对于其他形式膜结构,计算时应将膜与支承体系一起进行整体分析。

5.1.5 膜结构自重一般较小,地震对结构的影响较小,故设计时可不考虑地震作用,但地震对支承结构的影响应予考虑。

5.1.6 空气支承式膜结构是通过保持内部气压来维持结构形状并抵抗外荷载的。同时,内压又是作用在结构上的荷载,应与其他

荷载一起参与组合。内压是结构设计中的一个可变参数,可以根据外荷载的情况加压或减压,以调整结构的刚度和强度。

最大工作内压是指当结构处于不利的外界环境时,为防止结构出现过大大变形,如由于积水(雪)造成膜的凹陷、大风天气引起的膜体摆动等,由设计人员为操作人员确定的可以使用的最大内压。确定最大工作内压应考虑材料的设计强度、人员或设备出入口的强度、风机的选型、外界荷载类型等多种影响因素。

最小工作内压是指在正常气候和使用条件下,保持结构稳定所需的最小压力值。当恒荷载被分散到一定的影响区域时,最小工作内压应超过单位面积上恒荷载的最大值。

正常工作内压是由设计人员确定的一个压力范围。在正常工作内压下,结构在常遇荷载作用下能够保持稳定。正常工作压力应根据使用情况和进出情况,在最小工作内压至最大工作内压之间变化。在公共聚会场所,为保证环境的舒适度,应适当减小出入口处的风速和作用在门上的压力,工作内压不宜超过 300Pa;对主要用于仓储的场所,当车辆进出时工作内压值可以取大一些,以保证结构的稳定性。工作内压要以在当时外荷载下保证结构的正常使用为原则来确定。

5.2 初始形态分析

5.2.1 在膜结构初始平衡曲面内预张力是自相平衡的。膜结构的平衡曲面可分为两类:等应力曲面和非等应力曲面。等应力曲面是指膜面内预张力均匀分布,此时膜面面积最小(即最小曲面)。非等应力曲面是指膜面内预张力不均匀分布但自相平衡。膜结构初始形态分析宜首先寻找应力均匀的最小曲面,在最小曲面不存在的情况下再寻找应力不均匀的平衡曲面。

5.2.2 膜结构的形态分析实际上是确定结构中预张力大小和分布的过程。预张力值的设定应保证膜材在正常使用状态下不会因温度、徐变和荷载作用等而发生松弛,并应保证膜材在极端气候条

件下最大应力小于设计应力,同时应考虑结构张拉的实现和安装方便。

5.2.3 本条给出的初始预张力最小值,是参考国内外膜材应力-应变试验结果和工程经验提出的。

5.3 荷载效应分析

5.3.1 当膜结构在荷载作用下产生较大应力或变形时,应返回初始形态确定阶段对膜结构进行调整。通常可调整初始预张力大小和分布、调整结构外形或增加加强索数量等。

5.3.2 膜结构自重较小,属风敏感结构,在风荷载作用下易产生较大的变形和振动。对于该问题国内外已开展了一定的研究工作,但是由于膜结构形态各异,很难用统一的风载体型系数和风振系数来描述。对于形状复杂、跨度较大或重要的建筑物,必须进行风洞试验和风振分析,以确定风荷载动力影响。对于较常用的骨架支承膜结构和整体张拉式膜结构,本规程在总结国内现有研究成果的基础上给出了风载体型系数和风振系数的参考值,便于工程设计应用。

5.3.3 国外膜结构设计大多采用单一安全系数设计方法。设计表达式为:

$$K(S_{Gk} + S_{Qk}) \leq R_k \quad (4)$$

式中: K ——安全系数;

S_{Gk} ——永久荷载效应标准值;

S_{Qk} ——可变荷载效应标准值;

R_k ——结构抗力标准值。

各国对安全系数 K 的取值不尽相同:大多数国家都按照短期荷载和长期荷载取值,其值分别在 3~4 和 6~8 的范围内。如美国的安全系数取 3~8;日本临时(短期)荷载下取 4,持久(长期)荷载下取 8。我国近年来在工程设计中也分别采用 4 与 8。计算结构抗力时所采用的材料强度值则与膜材强度平均值较为接近。本

规程根据现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 的要求给出的膜材强度标准值比过去采用的强度平均值降低约 15%。因此,如果把式(6)中的 R_k 理解为结构抗力的标准值,则式中的安全系数 K 也应做相应调整:短期荷载下取 3.5,长期荷载下取 7。这基本上相当于本规程第 3.3.5 条所规定的第二类 and 第一类荷载效应组合。

根据现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068,本规程采用概率极限状态设计方法,设计表达式为:

$$R - S_G - S_Q = 0 \quad (5)$$

式中: R ——结构构件抗力设计值;

S_G ——永久荷载效应设计值;

S_Q ——可变荷载效应设计值。

$$R = \frac{R_k}{\gamma_R} \quad (6)$$

$$S_G = \gamma_G \cdot S_{Gk} \quad (7)$$

$$S_Q = \gamma_Q \cdot S_{Qk} \quad (8)$$

式中: γ_G ——永久荷载分项系数,根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 取 1.2;

γ_Q ——可变荷载分项系数,根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 取 1.4;

γ_R ——抗力分项系数,需根据现行的安全系数换算求得。

由式(4)~式(8)可得:

$$\gamma_R = \frac{K(S_{Gk} + S_{Qk})}{\gamma_G S_{Gk} + \gamma_Q S_{Qk}} \quad (9)$$

令 $\rho = \frac{S_{Qk}}{S_{Gk}}$,代入式(9)得到:

$$\gamma_R = \frac{K(1+\rho)}{\gamma_G + \gamma_Q \rho} \quad (10)$$

据此,根据不同的 K 值和 ρ 值,可求得相应的 γ_R 值。

例:根据《建筑荷载规范》GB 50009 规定,取 $\gamma_G = 1.2$ 、 $\gamma_Q = 1.4$;膜结构自重 20N/m^2 ;

1 第一类组合(长期荷载)情况下 $K=7$,如雪荷载标准值为 450N/m^2 (哈尔滨):

$$\rho = \frac{\text{雪}}{\text{恒}} = \frac{450}{20} = 22.5, \text{则 } \gamma_R = \frac{1+22.5}{1.2+1.4 \times 22.5} \times 7 = 5.0$$

本规程取 $\gamma_R=5$ 。

2 第二类组合(短期荷载)情况下 $K=3.5$,取风荷载标准值为 550N/m^2 (上海):

$$\rho = \frac{\text{风}}{\text{恒}} = \frac{550}{20} = 27.5, \text{则 } \gamma_R = \frac{1+27.5}{1.2+1.4 \times 27.5} \times 3.5 = 2.5$$

本规程取 $\gamma_R=2.5$ 。

对于连接节点处及边缘部位的膜材,由于有一定程度的局部削弱和应力集中,所以安全系数取值应适当提高,取强度折减系数 $\zeta=0.75$ 。

E 类膜材在双向应力作用下材料的屈服准则一般认为满足 Mises 屈服准则,鉴于目前对 E 类膜材的双轴拉伸研究还不多,同时膜面最大应力一般仅限于局部区域,本规程没有计算折算应力,仍采用最大主应力进行强度校核。

目前为止,国内外均没有正式发布的 ETFE 膜结构设计标准,相关企业根据自身的经验参考织物类膜材的办法,对破断强度进行折减后用于设计。E 类膜材第二屈服点的应变约为 15%~16%,超过第二屈服点以后膜材应变迅速增大,破断时应变通常超过 300%。因此,利用破断强度作为抗拉强度并不合理,折减系数也难以确定。第一屈服强度和第二屈服强度是 E 类膜材两个比较稳定的强度参数,且具有较为明确的物理意义,适用于 ETFE 膜结构设计。

与织物类膜结构相同,非空气支承式 ETFE 膜结构通过张拉施工导入预张力,由于 E 类膜材裁剪缩小率较小(一般小于 1%),

材料的徐变、塑性变形等容易导致膜面预张力的下降并发生膜面松弛。对于空气支承式 ETFE 膜结构,膜面通过空气内压张紧,材料的徐变及塑性变形等除了可能使膜面形状发生一些变化外,不会导致膜面松弛。因此,本规程分别将第一、第二屈服强度标准值规定为非空气支承式、空气支承式 ETFE 膜结构的膜材抗拉强度标准值。

E 类膜材屈服后变形性能相当好,破断强度明显大于屈服强度,且热合连接处的破断强度大于第二屈服强度,因此对于 ETFE 膜结构,连接节点处及边缘部位膜材可不进行强度折减。

根据现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 的要求计算得到 E 类膜材材料抗力分项系数及强度设计值见表 2。考虑到 E 类膜材破断强度标准值为 36.8MPa,破断强度标准值与本条规定的各强度设计值之比在 2.0~4.0 之间。

表 2 E 类膜材强度设计值

	非空气支承式		空气支承式	
	风荷载组合	雪荷载组合	风荷载组合	雪荷载组合
强度标准值(MPa)	16.3		22.5	
抗力分项系数	1.2	1.8	1.2	1.4
强度设计值(MPa)	13.6	9.1	18.8	16.1

需要指出的是,雪荷载组合时非空气支承式结构 E 类膜材材料抗力分项系数 1.8 是在按现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 计算结果的基础上再乘以 1.3 系数后确定的。现有实验表明,常温下当应力超过约 9MPa 时 E 类膜材会发生明显的徐变现象,考虑到长时间积雪时膜材容易出现徐变,对非空气支承式结构将抗力分项系数调整为 1.8,此时强度设计值为 9.1MPa。积雪时膜面温度较低,E 类膜材低温下的徐变可能有所减缓,鉴于目前还没有足够的低温徐变数据,本规程暂按 E 类膜材的常温徐变特性对抗力分项系数进行调整。当有足够的低温徐变实验数据时,可对 1.3 系数进行调整。

5.3.4 对于体育场看台挑篷一类的张拉式膜结构,其整体位移可定义为内环的最大位移;对于索系支承式膜结构,其整体位移可定义为跨中最大位移。膜结构在荷载效应分析时的膜单元,是指由柔性索边界或刚性边界围起的一片膜。膜单元名义尺度,对于三角形膜单元可定义为最小边长的 2/3;对于四边形膜单元可定义为通过最大位移点的边界间最小跨度。

空气支承式膜结构的刚度与工作气压相关,目前国内外尚无关于其变形限值的规定。参考相关工程经验,建议空气支承式膜结构在使用载荷和正常工作气压下的变形应满足如下条件:①结构最大变形不大于未变形状态膜、索与内外物体间净距的 0.5 倍;②不会因大变形导致膜面积水或积雪;③不会因较大的变形和振动导致内部人员的不舒适感。

本规程在修订时对膜结构变形的规定均由“应”改为“宜”,对结构变形的要求有所放松,允许设计者根据具体情况稍有选择。

5.3.5 膜结构出现松弛将降低其刚度,在风荷载作用下易发生剧烈振动,甚至导致膜材撕裂。此外松弛还将影响结构的美观和排水性能。因此,应尽量避免膜材在正常使用状态(第一类荷载效应组合)下出现松弛。

5.3.6 索是膜结构中的重要受力构件,一旦处于受压状态,就有可能导致结构变为机动体,因此规定,索在第一类荷载效应组合作用下均应处于受拉状态。

5.3.7 理论上,密闭空间的内部压力与体积成反比关系,即 $p \cdot V = \text{常数}$ 。空气支承式膜结构的工作气压与两方面因素有关,一方面是充气系统的送风,另一方面是换气系统、门以及一些连接部位的出风。正常使用情况下这是一个动态的平衡状态,工作气压基本保持恒定。

在第一类荷载效应组合下,由于空气支承式膜结构的变形是缓慢的,体积也是缓慢变化的,可以认为工作气压是不变的,所以可按内压不变进行非线性分析。但是在第二类荷载效应组合下,

由于风荷载的参与,膜结构的变形是瞬时的,体积变化也是瞬时的,充气系统来不及调整送风量以达到工作气压的动态平衡,因此气枕式和气肋式膜结构应按内压变化进行非线性分析。而气承式膜结构由于密闭空间体积较大,且内压高低对结构安全可能有利也可能不利,所以应按内压不变和内压变化两种工况进行非线性分析。

5.4 裁剪分析

5.4.1 裁剪分析的目的是确定裁剪线和裁剪片,以便在拼接张拉后实现初始状态下的膜曲面,所以,裁剪分析应根据初始状态的膜曲面和预张力进行。

通过初始形态分析可以确定膜曲面的形状。该曲面是由一定幅宽的膜材,经过裁剪成膜片,并互相连接后张拉而成。膜曲面上膜片间的连接为裁剪线。裁剪膜片是待求平面,而膜曲面上的膜片是空间的,并且在裁剪线确定后是已知的,所以确定平面裁剪膜片的关键是如何将已知的空间膜片展开成平面裁剪膜片。实际生成的曲面和形态分析所得的曲面之间的误差,取决于空间膜片展开成平面的精度。由于膜曲面上的空间裁剪片具有预张力,所以确定裁剪片时还必须考虑预张力释放后的几何改变。

5.4.2 膜材的裁剪线可采用测地线法、平面相交法或其他有效的方法确定。

测地线法是指在膜结构初始预应力平衡曲面上寻找测地线作为裁剪线。测地线指曲面上两点之间距离最短的线。对于可展曲面,展开平面上的测地线为直线;对于不可展曲面,展开平面上的测地线接近直线。

平面相交法是指在膜结构初始预应力平衡曲面上,用一组平面按一定规律与曲面相交,并将各交线作为裁剪线。

测地线法得到的膜片宽度较为接近,节省膜材,但在曲面上形成的热合线美观性和视觉效果稍差。平面相交法可根据需要得到

具有美观性和一定视觉效果的裁剪线。裁剪分析时应综合考虑经济性和美观性两个因素后确定裁剪线。

5.4.3 由于膜材在裁剪线处断开,故此处易产生应力集中。如果裁剪线处剪应力较大会影响膜材的受力性能,所以应尽量做到裁剪线与膜材纤维正交,使主应力方向与纤维方向一致,避免裁剪线受剪。

5.4.4 膜结构曲面的形成与初始预张力作用有关,裁剪时必须考虑膜材应力释放后的弹性回缩。通常根据初始预张力大小和所用膜材的性能,通过修正裁剪膜片几何尺寸(沿经向和纬向回缩)来消除膜内预张力的影响。

6 连接构造

6.1 一般规定

6.1.3 实际工程中除了柔性边界可以通过调节钢索的长度实现二次施加预张力外,由于施工困难的原因,骨架支承式膜结构很少进行二次张力导入。实践证明,施工中采用超张拉的方法也能够保证膜结构张力的长期稳定性。因此,设计上需要考虑二次张拉的可能性,同时如果采用超张拉手段能够保证膜面预应力的长期稳定,可以不进行二次张拉。

6.1.10 膜结构中的金属连接件直接与膜材相连,易受外界影响而锈蚀,不但易污染膜材,影响美观,而且往往会引起截面削弱而产生安全隐患。因此,全部金属连接件均应进行防腐处理。对重要的工程应采用铝合金或不锈钢夹板、夹具和不锈钢紧固螺栓;其他工程可采用钢制夹板、夹具和镀锌紧固螺栓。当采用铝合金夹板、夹具时,应做电化学阳极氧化处理;当采用钢制夹板、夹具时,应进行热镀锌防腐处理。膜结构的角板一般外露,宜采用热镀锌防腐处理。

当采用不锈钢作连接件,可使用 304 材质的不锈钢,在干燥清洁的大气中,有优良的抗锈蚀能力,但在含有大量盐份的海雾中很快会生锈,这时可以使用耐腐蚀性更好的 316 材质的不锈钢、双相不锈钢等。

6.1.11 膜材对缺陷比较敏感。若膜材中存在小孔、裂纹等缺陷,膜材强度将有较大降低。在膜材与支承骨架相连处的毛刺、尖角、尖点将使该处出现应力集中。对膜材涂层的擦伤也会影响膜材的使用寿命。

6.2 膜材的连接

6.2.1 膜结构的曲面是由许多平面膜材经裁剪设计搭接而成,膜材幅宽较小,因此膜片间需经接缝连接。膜材接缝的连接应根据不同膜材选用不同的方式。粘接结合耐久性较差,不宜采用。缝合和机械连接方式易造成截面削弱,使用时应予以注意。膜材的主要受力接缝宜采用热合方法连接。膜材的热合部由于存在应力集中现象,不可能达到 100% 的母材强度。膜材的热合缝宽度达到一定程度后,继续加宽也无法提高热合缝的强度,应该通过工厂对热合温度、压力条件等对热合进行严格的品质管理来达到热合的强度要求。

6.3 膜与刚性边界的连接

6.3.1 膜材直接搁置于支撑的主结构钢管或小钢管上时,需要对风荷载下膜材与钢结构的游离进行结构验算。风荷载下膜面脱离钢结构时,应验算膜材脱离后四周钢结构以及膜面能否满足设计要求。关于膜材与钢结构的游离,日本规范采用如下方法进行判定:即在 $1/2$ 风荷载作用下,膜材发生游离的长度不超过钢结构总长的 $1/3$ 。设计时应根据工程当地暴风的发生频率对是否容许膜面与钢结构发生游离进行判断,必要时可采取膜材与钢结构固定的措施。

6.3.6 当膜材直接连接于刚性边界上时,应尽量避免出现直角或锐角的边界形状,以减少安装难度并避免产生应力集中。

6.4 膜与柔性边界的连接

6.4.1 膜材与钢索可以单边或双边连接。简单的连接方法是将钢索穿入热合好的膜套中。对重要工程,可采用铝合金或不锈钢夹板和连接件来连接膜材与钢索。

7 制 作

7.0.1 膜材的裁剪、热合是膜结构加工制作过程的重要环节,应严格按照裁剪设计图纸和工艺文件进行,无设计变更文件时不得随意更改,各类膜材的热合设备也不能混用。

7.0.2 即使是同一品牌、同一型号的膜材,对不同的生产批次,一般也有不同程度的色差和不均质。因此,建议同一工程使用同一批号的膜材。

7.0.3 易褪色物品或有害于膜材的化学溶剂,对膜材会有一定损伤,应分开存放。

7.0.4 灰尘会造成热合设备在膜材热合时打火、烧焦或击穿膜材,因此,整个加工制作过程应保持清洁。

7.0.5 有些膜材的表面涂层,如不经处理而直接搭接热合,连接强度将会受到影响,因此,必须将表面涂层打磨后方可热合。此时,应注意打磨不得损伤膜材,以免影响热合处的拉伸强度。

7.0.7 原《规程》条文中要求膜片各向尺寸偏差应控制在 $\pm 2\text{mm}$ 之内,此要求对长度 $1\text{m}\sim 3\text{m}$ 的膜片是可以达到的,但对长度较长的膜片很难保证此精度。自动切割时存在裁剪机的划线误差、刀片走行时的机械误差、刀片切割时的膜片拱起误差等。自动裁剪机的长度也存在局限性,一片长度较长的膜片有可能需要切割几次才能切割完毕,还存在切割一次后再次切割时的对齐误差。考虑到膜结构通常跨度较大,长度 $1\text{m}\sim 3\text{m}$ 的膜片占比很少,因此对 10m 以下的膜片统一按长度 $3\text{m}\sim 10\text{m}$ 时工艺上能够达到的误差 $\pm 3\text{mm}$ 来要求,对 10m 以上膜片各向尺寸偏差要求应控制在 $\pm 6\text{mm}$ 之内。原《规程》条文中要求 G 类膜材周边尺寸与设计尺寸的偏差,不应大于 0.5% ,但由于 G 类膜材存在膜材热合时

的热收缩影响实际上比 P 类膜材还要大,因此对 G 类膜材也统一按 P 类膜材的 1% 来要求。

7.0.8 受热合温度影响,膜材可能会收缩变形,因此应注意工艺要求,以保证热合后均匀平整。热合缝的宽度不得出现负偏差的要求工艺上比较难控制。由于在达到一定宽度后再继续增加宽度,热合缝的强度增加不明显,目前常用热合缝宽度的确定已经考虑了热合缝在高温环境下强度下降的因素,有一定的安全储备,因此提出不做热合缝的宽度不得出现负偏差的要求。

7.0.10 包装时, P 类膜材可采用折叠方式, G 类膜材宜采用卷装方式。为便于膜单元现场安装,折叠或卷装的顺序宜与施工时的展开方向相反。

7.0.13 钢丝绳下料前应进行预张拉,以消除非弹性变形。热挤聚乙烯高强钢丝束和钢绞线,在出厂时一般已进行过预张拉。膜结构设计时,图纸中标注的拉索长度一般为预张力后的尺寸,在索制作时应予注意。

安全警示图 5.8

式推窗式窗 5.8

8 安 装

8.1 钢构件、拉索安装

8.1.1 现场应具备的安装条件包括:支承结构完成施工、混凝土达到强度要求,具备构件堆放和组对场地,具备吊车出入通道和支吊场地等。

8.1.2 膜结构是整体空间结构体系,支承位置的准确性会直接影响结构体系中的内力分布。为使工程施工与设计假定相一致,要严格控制支承结构和预埋件的尺寸偏差。

8.1.7 膜安装前,应对与膜接触的连接板上的孔数、孔间距进行校验。

8.2 膜单元安装

8.2.1 为使膜单元在施工全过程中保持清洁,应避免土建施工引起的扬尘和外装饰施工中使用的涂料对膜面造成污染。

8.2.5 膜单元在地面或高空作业平台上展开前,应先清洁地面或平台并铺设保护膜。与空中展开或吊装膜单元时,应避免吊点受力过大造成膜材撕裂。

8.2.6 可靠的临时固定措施应能抵抗施工期间可能发生的强风,还应保证膜面不积水。

8.3 施加预张力

8.3.1 设置可调部件是为了适应制作和安装误差。可调部件上应有设计位置的标示。

8.3.2 确定施力位置时应注意以下各点:通过该点应能将力均匀传递至周围各点,不得有死角;受力部件的力值不宜过大;便于整

个结构体系安装;掌握施力机具的人员易于操作。

确定施力点位移量时应注意便于索膜安装,并适当留有余量,以消除整个结构体系存在的误差。

8.3.6 对施力点检测力值目前尚不能普遍实行,只能对有代表性的施力点进行力值抽检。这是检查工程施工结果与设计假定吻合程度的重要手段。

9 工程验收

9.0.1 一般情况下,膜结构子分部工程可按制作分项工程与安装分项工程进行验收,但在实际工程中也可仅划分为膜结构安装分项工程,膜单元成品可按材料/构配件进场报验的方式直接报验,需提供数量清单、质量证明、过程控制、自检结果等文件。

9.0.3 膜结构工程中施加预张力是一关键环节,其施加过程和数值记录应包含在施工现场质量管理检查记录中。

9.0.4 膜结构、钢构件、索等在制作、安装过程中均可能出现尺寸误差,膜面还可能局部出现褶皱,如经设计、制作、安装方协商,认为不影响安全使用,即可不做处理。

对于膜面张力值的检查,目前国内外尚无能够准确测量膜面张力的仪器,此项规定不要求强制执行,但要求进行过程控制,并做经验判断。

空气支承膜结构与常规结构不同之处在于必须充气才能使用,因此验收前必须进行充气系统的测试。

10 维护和保养

10.0.1 膜结构建筑竣工后要十分重视维护和保养,以保证正常使用,这与一般建筑物是不同的。膜结构建筑的长期维护和保养应有专人负责。

10.0.3 在竣工后的一段时间内,制作安装单位应负责检查和维护,并向使用单位提供维护保养手册。

10.0.7 空气支承膜结构应始终保持设计的工作内压,目的是保证建筑结构的稳定性,并防止在大风或积雪下过度变形。

需本标准可按如下地址索购:

地址:北京百万庄建设部 中国工程建设标准化协会

邮政编码:100835 电话:(010)88375610

不得私自翻印。

S/N:1580242 • 829



9 158024 282900 >

统一书号:1580242 • 829

定价:37.00 元